



指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD03—2007

中国船级社

船用柴油机硅油减振器检验指南

2007

北 京

目 录

1 适用范围·····	1
2 认可和检验的依据·····	1
3 术语和定义·····	1
4 图纸和技术文件·····	1
5 产品的设计和技术要求·····	2
6 型式试验·····	9
7 产品检验·····	10
8 其他·····	11
附录 1 船舶入级产品持证与检验要求一览表·····	12
附录 2 柴油机硅油减振器型式试验报告实例·····	13

1 适用范围

1.1 本指南适用于船用柴油机硅油减振器(以下简称减振器)的型式(设计)认可和产品检验,也可供柴油机和减振器制造厂参考使用。

2 认可和检验的依据

- 2.1 本社《钢质海船入级规范》。
- 2.2 本社《钢质内河船舶建造规范》。
- 2.3 本社《材料与焊接规范》。

3 术语和定义

- 3.1 本指南所涉及产品检验的术语和定义见本社《钢质海船入级规范》。
- 3.2 本指南所涉及扭转振动的术语和定义参见本社《船上振动控制指南》和本社有关规范相关内容。

4 图纸和技术文件

4.1 应将减振器的下列图纸资料提交本社批准:

- (1) 减振器的纵中剖面图(包括结构尺寸、材质等);
- (2) 减振器设计计算书,计算书应包括如下内容:
 - ① 减振器与所配机型柴油机轴系的自由振动和强迫振动的扭振计算;
 - ② 减振器惯性环和壳体转动惯量的计算;
 - ③ 减振器阻尼系数的计算;
 - ④ 减振器的硅油名义粘度的计算;
 - ⑤ 减振器的散热面积计算;
 - ⑥ 减振器的功率损失计算;
- (3) 减振器型式试验大纲。

4.2 应将下列文件和资料提交本社备查:

- (1) 有关工厂概况(包括工厂历史及现状)、产品生产历史的说明,如产品经过专门的验证或鉴定,可附上有关报告及证书。
- (2) 质量控制计划——制造者应建立认可范围产品的质量控制计划并提交本社审批。

质量控制计划应按产品技术要求或标准，描述产品制造过程中的质量保证和控制的方法，应反映本社规范要求的检验和试验要求。

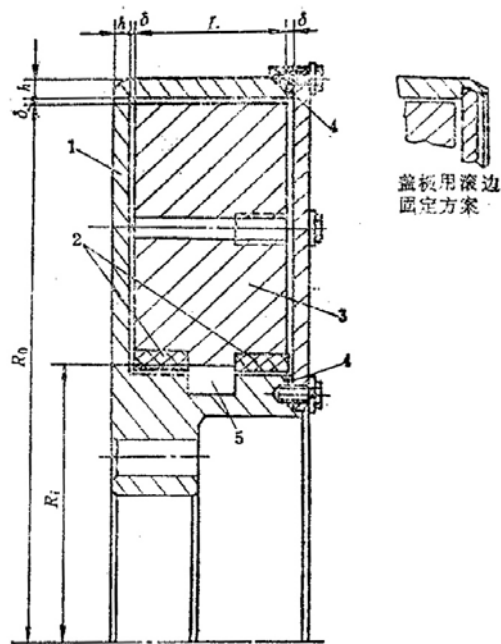
5 产品的设计和技术要求

5.1 一般要求

5.1.1 减振器的设计通常只考虑所配柴油机曲轴轴系的性能和扭振参数。

5.1.2 减振器的设计可采用双质量系统法或多质量系统法。

5.1.3 应通过扭振计算确定图 5.1.3 中的结构尺寸。



1、环形壳体 2、摩擦环 3、惯性环 4、密封垫圈 5、储油槽

R_o ——减振器惯性环外径，mm； R_i ——减振器惯性环内径，mm；

δ ——减振器惯性环与壳体之间的间隙，mm； L ——减振器惯性环厚度，mm； h ——壳体厚度，mm。

图 5.1.3 硅油减振器结构图

5.1.4 减振器的壳体、惯性环可用铸铁、铸钢或锻钢制造，壳体亦可以用钢板制造。所用材料的理化性能应符合本社《材料与焊接规范》的有关规定，且其抗拉强度 R_m 应符合表 5.1.4 的规定。

表 5.1.4

钢 种	抗拉强度 R_m (N/mm ²)
铸 铁	>200
铸 钢	>400
锻钢、钢板	400—600

5.1.5 焊接的壳体应进行消除内应力的热处理。

- 5.1.6 铸造的减振器壳体和惯性环加工前一般应进行磁粉或渗透检测。
- 5.1.7 一般壳体壁厚 h 为惯性环外径 R_0 的 $1/25 \sim 1/30$ 。
- 5.1.8 减振器壳体上除进油孔外，一般还应开有排气孔。
- 5.1.9 减振器的惯性环上一般应开有 $2 \sim 4$ 个平衡孔。
- 5.1.10 减振器壳体内表面和惯性环外表面的加工精度应不低于 $\sqrt[3.2]{}$ 。
- 5.1.11 铸造壳体内表面及惯性环外表面一般应镀铬或锌，或采取其他表面处理措施。
- 5.1.12 减振器的摩擦环一般可用磷青铜制造，亦可采用聚四氟乙烯制造。
- 5.1.13 减振器工作时，壳体温度应不超过 115°C 。

5.2 双质量系统法

5.2.1 将柴油机曲轴轴系简化为单质量当量系统，并加装有硅油减振器后为双质量当量系统，见图 5.2.1。

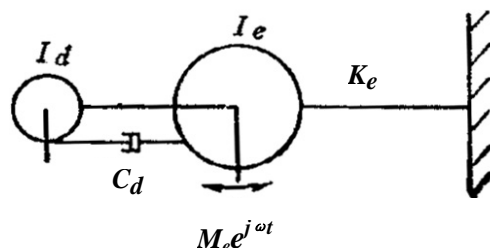


图 5.2.1 双质量当量系统

系统的运动方程为：

$$I_d \ddot{\varphi}_d + C_d (\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_e) = 0$$

$$I_e \ddot{\varphi}_e - C_d (\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_e) + K_e \varphi_e = M_e e^{i\omega t}$$

式中： I_d ——减振器惯性环的转动惯量， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

I_e ——柴油机轴系当量转化的转动惯量 ($I_e = \sum_{K=1}^z I_k \alpha_k^2$ 取自柴油机曲轴系统自由振

动计算的结果， z ——气缸数， I_k ——第 k 质量的惯量， α_k ——第 k 质量的相对振幅) $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

C_d ——减振器的阻尼系数， $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ ；

K_e ——柴油机轴系当量转化的扭转刚度 ($K_e = I_e p^2$ ， p ——柴油机原系统的自振圆频率， rad/s)， $\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ；

M_e ——作用在系统上的当量激励力矩幅值 ($M_e = M_r \sum \alpha_k$ ， M_r ——干扰力矩，

$N \cdot m$; $\sum \alpha_k$ ——相对振幅矢量和), $N \cdot m$;

ω ——激励力矩的圆频率, rad/s ;

t ——时间, s ;

$\dot{\varphi}_d, \ddot{\varphi}_d$ ——减振器惯性环的角速度和角加速度, $\text{rad/s}, \text{rad/s}^2$;

$\varphi_e, \dot{\varphi}_e, \ddot{\varphi}_e$ ——轴系当量集中质量的角位移、角速度和角加速度, $\text{rad}, \text{rad/s},$
 rad/s^2 。

5.2.2 配有减振器的柴油机轴系双质量系统的自由振动和强迫振动计算。

(1) 审查 5.2.1 中的 I_e 、 K_e 、 p 及 M_e 的数值;

(2) 审查强迫振动计算的柴油机曲轴自由端共振振幅 A ;

A 为曲轴各轴段的应力不超过规范持续许用扭振应力的第一质量点的振幅或最小振幅, rad 。

(3) 审查振幅放大系数。

减振器振幅放大系数为:

$$m = \frac{AK_e}{M_e}$$

式中: A ——与 5.2.2 (2) 中相同;

K_e 、 M_e ——与 5.2.1 中相同。

5.2.3 减振器惯性环转动惯量的计算。

(1) 惯量比

减振器的惯量比与振幅放大系数的关系为:

$$m = 1 + \frac{2}{\mu}$$

式中: m ——与 5.2.2 (3) 中相同;

μ ——惯量比, $\mu = \frac{I_d}{I_e}$, 其中 I_d , I_e 与 5.2.1 中相同。

在强迫振动计算中, 根据 A 而确定 m , 并根据 m 而确定 μ 。

(2) 惯性环的转动惯量为:

$$I_d = \mu I_e \quad \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

式中： μ 、 I_e ——与 5.2.3 (1) 中相同。

① 一般 $\mu < 0.35$ ， I_d 为 1~2 倍单位气缸转动惯量；

② 惯性环惯量与壳体惯量之比一般取 1.25~2.86；

③ 考虑柴油机结构布置许可条件，按 I_d 的数值来确定惯性环的结构尺寸。在图 5.1.3

中，一般 $R_i / R_o = 0.25 \sim 0.65$ ； $L / R_o = 0.15 \sim 0.60$ 。

5.2.4 共振点的频率比为：

$$\eta_{II} = \frac{\omega_{II}}{p} = \sqrt{\frac{2}{2+\mu}}$$

式中： ω_{II} ——双质量系统的共振频率，rad/s；

p ——与 5.2.1 中相同；

μ ——与 5.2.3 (1) 中相同。

设计时应 $\omega_{II} < p$ ，减振器主要减振的谐次（一般为主谐次）的临界转速一般应低于 0.9 倍的主机额定转速。

5.2.5 减振器阻尼系数的计算。

减振器的阻尼系数为：

$$C_d = 2I_d p r \quad \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$$

式中： I_d 、 p ——与 5.2.1 中相同；

$$r \text{——阻尼比，} r = \frac{1}{\sqrt{2(1+\mu)(2+\mu)}}, \text{ 其中：} \mu \text{ 与 5.2.3 (1) 中相同。}$$

采用 C_d 进行双质量强迫振动计算的结果应满足 5.2.2 (2) 的要求，否则应调整 I_d 的数值并重新确定 C_d 的数值。

5.2.6 减振器的硅油粘度的计算。

(1) 硅油的有效粘度（温度为 60℃）；

减振器的硅油通常称二甲基硅油，其粘度以“厘斯”为单位，用符号“cs”表示。减振器运转中的硅油有效粘度 ν_{eff} 按下式确定：

$$v_{eff} = \frac{C_d \delta}{9.98 \times 10^{-13} \times 2\pi L R_0^3 \left(1 + \frac{R_0}{2L} \eta_R\right)} \quad \text{cs}$$

式中： δ 、 R_i 、 R_o ——见图 5.1.3；

η_R ——修正系数，其值按表 5.2.6 (1) 选取。

表 5.2.6 (1)

$\left(\frac{V}{\delta}\right)_m$ \backslash R_i/R_o	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
$\left(\frac{V}{\delta}\right)_m < 700$	1.04	1.03	1.01	0.97	0.89	0.77	0.61
$700 < \left(\frac{V}{\delta}\right)_m < 1000$	1.11	1.10	1.08	1.03	0.94	0.81	0.58

表中 $\left(\frac{V}{\delta}\right)_m$ 为平均剪切率，其值按下式确定：

$$\left(\frac{V}{\delta}\right)_m = 0.49 \frac{\omega_{II} A R_o}{\delta} \quad (\text{rad}^2/\text{s} \text{ 或 } 1/\text{s})$$

- ① δ 值不宜过大，一般取 $\delta = 0.25 + 0.022\sqrt{R_o}$ ，mm；
- ② A ——与 5.2.2 (2) 中相同；
- ③ $\left(\frac{V}{\delta}\right)_m < 10^3$ 1/s。

(2) 硅油的名义粘度（温度为 25℃）。

当按 5.2.6 中公式求得工作状态下的硅油有效粘度后，名义粘度可按下式计算：

$$v_o = \frac{v_{eff}}{\eta_v \eta_t} \quad \text{cs}$$

式中： η_v ——剪切率修正系数（图 5.2.6 (2) —1）；

η_t ——温度修正系数（图 5.2.6 (2) —2），硅油减振器装在柴油机内时，硅油温度可取为 75℃；装在机外时，可取为 45℃。

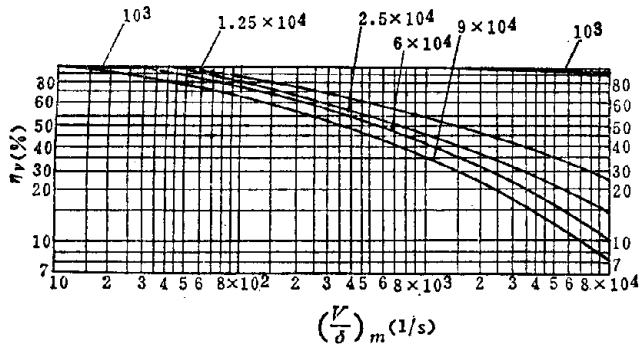


图 5.2.6 (2) —1 剪切率修正曲线

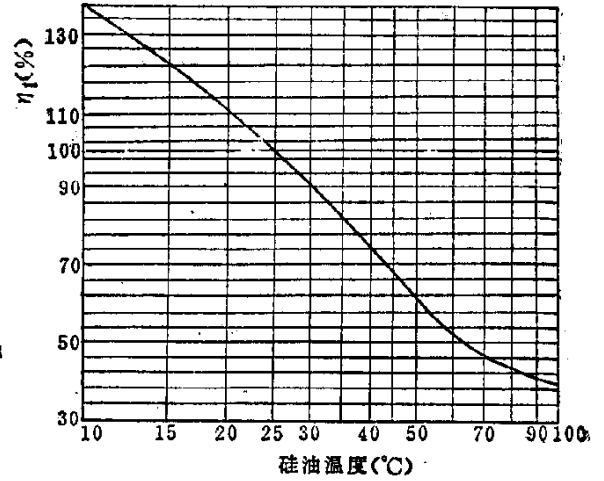


图 5.2.6 (2) —2 温度修正曲线

- ① 核查所灌装硅油的型号;
- ② 一般 v_o 为 $1.25 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ cs;
- ③ $v_{eff} < v_o$ 。

5.2.7 功率损失为:

$$N_d = 2.503 \times 10^{-4} \times \omega_{II}^3 I_d A^2 \quad \text{kW}$$

式中: ω_{II} ——与 5.2.4 中相同;

I_d ——与 5.2.1 中相同;

A ——与 5.2.2 (2) 中相同。

5.2.8 减振器散热面积为:

$$S = 2\pi (R_o^2 - R_i^2 + LR_o + LR_i) \times 10^{-6} \quad \text{m}^2$$

式中: R_i 、 R_o 、 L ——见图 5.1.3。

5.2.9 功率损失 N_d 与散热面积 S 之比值应满足下式要求:

$$\frac{N_d}{S} \leq 6.39 \quad \text{kW/m}^2。$$

5.3 多质量系统法

将硅油减振器和柴油机曲轴轴系各质量点组成多质量系统, 见图 5.3。

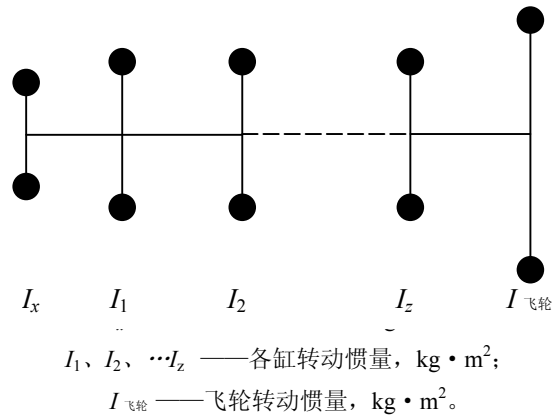


图 5.3 多质量当量系统

5.3.1 配有减振器的柴油机轴系的多质量系统的自由振动和强迫振动计算。

(1) 减振器计算时的当量转动惯量为:

$$I_x = I_h + \frac{I_d}{2} \quad \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

式中: I_h ——减振器壳体惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

I_d ——减振器惯性环惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

(2) 审查计算的柴油机曲轴自由端共振振幅 A ;

A 与 5.2.2 (2) 中相同。

(3) 审查带减振器的多质量系统的共振频率 ω_{II} 。

ω_{II} 与 5.2.4 中相同。

5.3.2 减振器阻尼系数计算。

最佳阻尼系数为:

$$C_d = I_d \omega_{\text{II}} \quad \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$$

式中: I_d ——与 5.2.1 中相同;

ω_{II} ——与 5.3.1 (3) 中相同。

(1) 采用 C_d 进行多质量系统强迫振动计算的结果应满足 5.2.2 (2) 的要求, 否则应调整 I_d 的数值, 并重新确定 C_d 的数值;

(2) I_d 的数值确定后, 审查内容同 5.2.3 (1)、5.2.3 (2)。

5.3.3 C_d 的数值确定后, 审查内容同 5.2.6—5.2.9。

5.4 产品设计的参数修正

5.4.1 减振器理论计算的阻尼系数 C_d ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$) 应在型式试验 6.3.6 中所得出数值的 $\pm 20\%$ 范围内, 否则应修改 5.2.5 或 5.3.2 中相应的计算参数。

6 型式试验

6.1 典型样品的选择原则

型式认可试验用的减振器的特性、特征及制造质量应能代表或覆盖申请认可的产品。每一型号的减振器均应选取一台进行型式试验。

6.2 型式试验项目

原材料检验; 减振器壳体检验; 惯性环检验; 惯性环平衡检验; 密封性能试验; 确定减振器当量转动惯量 I_x ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) 和阻尼系数 C_d ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$) 的台架试验。

6.3 型式试验方法及相应的技术指标

6.3.1 原材料检验。

减振器壳体和惯性环等的原材料的理化性能应符合批准图纸的要求, 减振器采用甲基(或乙基)硅油的名义粘度应与 4.1④ 中相同。

6.3.2 减振器壳体检验。

减振器壳体外形尺寸应符合批准图纸的规定。不应有严重的碰伤、锈蚀等缺陷。

6.3.3 减振器惯性环检验。

减振器惯性环外形尺寸应符合批准图纸的规定。不应有裂纹、气孔、疏松和缩孔等缺陷。

6.3.4 减振器惯性环平衡检验。

惯性环的厚度 L 与外径 R_0 之比小于 0.2 时一般只做静平衡试验; 当减振器惯性环外缘的线速度超过 25m/s 时, 还应做动平衡试验。每平衡平面上的残余动不平衡量应不大于按下式计算所得之值:

$$\frac{600m}{n} \quad \text{N} \cdot \text{mm}$$

式中: m —— 惯性环质量, kg;

n —— 惯性环的最大工作转速, r/min。

6.3.5 密封性能试验。

在环境温度不低于 $+10^\circ\text{C}$ 时, 将减振器固定在旋转机械(如车床、电动机等)上, 以柴油机 1.05 倍额定转速连续运转 10min, 各密封面、螺钉孔口及注油孔等处应无渗漏现象; 密

封性能试验亦可在 6.3.6 中台架试验中进行。

6.3.6 确定减振器当量转动惯量 I_x ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) 和阻尼系数 C_d ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$) 的台架试验。

(1) 台架试验可采用下述 2 种试验之一进行:

① 减振器试验台测试;

将减振器固定在试验台上, 试验台应能在 $10 \sim 100\text{Hz}$ 范围内输出确定的标准动态扭矩信号, 通过监测系统的共振频率和振幅, 确定减振器的当量转动惯量 I_x ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) 和阻尼系数 C_d ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$)。

② 减振器柴油机台架测试。

减振器的阻尼系数的设计计算为近似计算, 实际上通过近似的理论计算后, 应再经实测修正确定。测试分别按柴油机自由端不安装减振器(或安装试验用的惯性盘, 其转动惯量应等于 5.3.1 (1) 中的 I_x) 和安装减振器进行;

在柴油机整个工作转速范围内测试, 测得共振条件下的单机(到飞轮为止)或柴油机台架(包括水力测功器)的固有频率和柴油机自由端安装减振器壳体部位(连接法兰处)的振幅, 通过自由振动计算换算出减振器的当量转动惯量 I_x ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$), 通过强迫振动计算换算出减振器的阻尼系数 C_d ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$)。

减振器柴油机台架测试型式试验报告内容见附录 2。

(2) 台架试验时减振器壳体表面温度应不超过 115°C 。

7 产品检验

7.1 检验项目

原材料检验; 减振器壳体检验; 减振器惯性环检验; 减振器惯性环平衡检验, 减振器密封性能试验和减振器装配检验。

7.2 具体检验要求

7.2.1 原材料检验:按本《指南》6.3.1 条执行。

7.2.2 减振器壳体检验:按本《指南》6.3.2 条执行。

7.2.3 减振器惯性环检验:按本《指南》6.3.3 条执行。

7.2.4 减振器惯性环平衡检验:检查工厂平衡试验记录,按本《指南》6.3.4 条执行。

7.2.5 减振器密封性能试验:按本《指南》6.3.5 条执行。

7.2.6 减振器装配检验。

减振器的装配应在工厂检查员的监督下进行。验船师应经常到装配现场进行抽查, 抽检

的主要内容如下：

(1) 检查减振器壳体内表面和惯性环外表面的加工精度均不应低于 $\sqrt[3.2]{}$ ，进行磁粉或渗透检测时，不应有裂纹、气孔、疏松和缩孔等缺陷；

(2) 减振器装配前应清洗壳体内表面和惯性环外表面的油污，不应采用碱液清洗，宜采用蒸汽或煤油，并应用汽油或四氯化碳将残留煤油洗净；

(3) 减振器灌装硅油前应以 0.2MPa 气压进行密性试验；

(4) 减振器灌装硅油时，应有效排出减振器内的空气，一般可将硅油加热并采用对减振器抽真空灌装或压力灌装等方法。硅油应充满惯性环与壳体和盖板之间 90%左右的空隙，可用称重法加以检验；

(5) 惯性环转动时不应有与壳体摩擦和卡牢现象；

(6) 减振器盖板用滚边固定时，滚边的表面不应有裂纹、分层和折叠等现象；减振器盖板用螺钉固定时一般应采用整体密封圈，且应有螺钉防松和硅油防漏的措施。

8. 其他

8.1 制造厂应提供表 8.1 中的减振器特性参数：

表 8.1

减振器型号	适用机型	壳体惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	惯性环惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	阻尼系数 ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$)	功率损失 (kW)

8.2 减振器上应有产品铭牌，并有下列内容：

- (1) 产品名称；
- (2) 产品型号；
- (3) 制造厂的名称或商标；
- (4) 出厂编号及制造年月；
- (5) 本社产品检验标志。

8.3 减振器需经油封，并用支撑件将减器固定在衬有防潮材料的坚固包装箱内。

附录 1 船舶入级产品持证与检验要求一览表

产品名称	证件类别		单件/单批 (部件 ^① 或产品) 检验				认可模式				备注
	C/E	W	A	T	M	S	DA	TA-B	TA-A	WA	
硅油减振器	×	—	×	×	×	×	×	○	○	—	

符号说明：

1) A—由 CCS 图纸审查；M—产品的组成材料应检验；S—由 CCS 验船师在制造厂检验；T—型式或原形试验或型式检查，如适用。

2) C—船用产品证书；E—等效证明文件；W—制造厂证明；X—适用；O—可选。

3) DA—设计认可；TA-B—型式认可 B；TA-A—型式认可 A；WA—工厂认可。

附录 2 柴油机硅油减振器型式试验报告实例

1. 试验目的

通过试验验证硅油减振器的扭振参数——当量转动惯量 I_x ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) 和阻尼系数 C_d ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$)

2. 试验依据

按本社《柴油机硅油减振器检验指南》(以下简称“本指南”) 6.3.6 (2) 的要求进行。

3. 试验的柴油机主要技术参数:

柴油机型号: $\times \times \times \times$

减振器惯性轮惯量 I_d : $1.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

减振器壳体惯量 I_h : $0.78 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

阻尼系数 C_d : $\times \times \times \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$

4. 试验的工况及方法:

4.1、测试分单机和单机+硅油减振器两种工况, 测试框图分别见图 4.1-1、图 4.1-2。

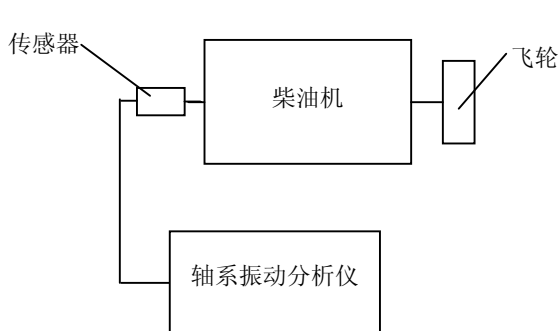


图 4.1-1

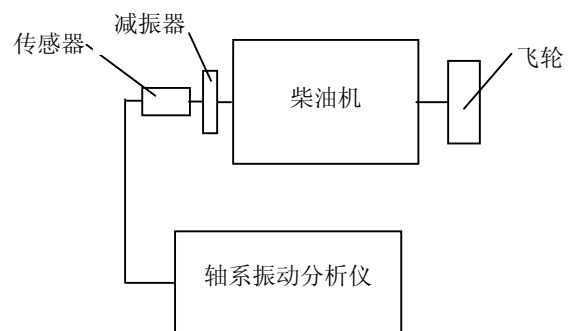


图 4.1-2

4.2 在 400—1200r/min 转速范围内, 每间隔 20r/min 左右为一档, 正常发火工况测试。

5. 测试及分析数据:

5.1 单机测试的典型频谱及原始波形分别见图 5.1-1、图 5.1-2、图 5.1-3 和图 5.1-4。

5.2 单机+硅油减振器工况测试的典型频谱及原始波形分别见图 5.2-1、图 5.2-2、图 5.2-3、图 5.2-4、图 5.2-5、图 5.2-6 和图 5.2-7。

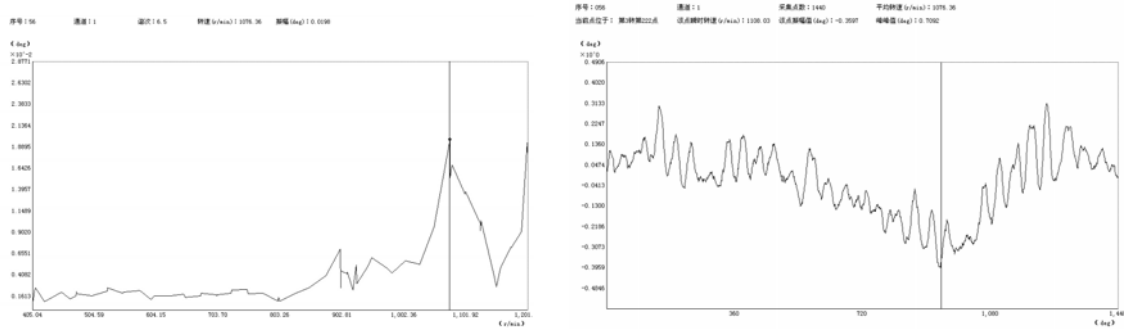


图 5.1-1 6.5 次频谱及原始波形

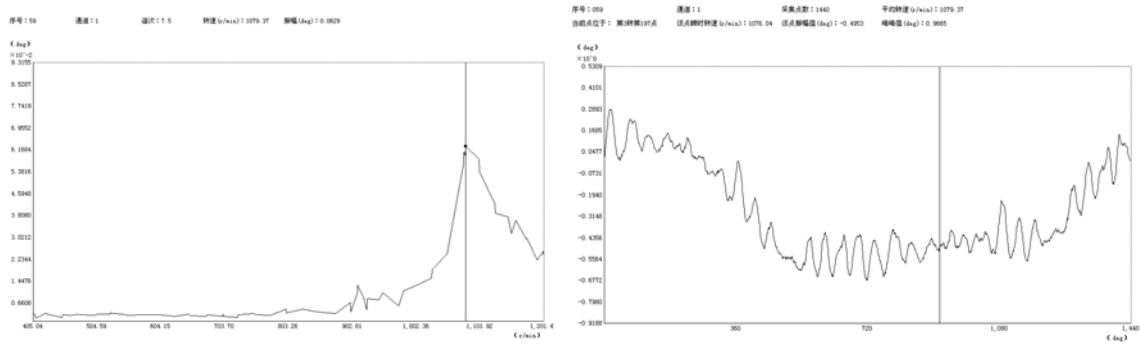


图 5.1-2 7.5 次频谱及原始波形

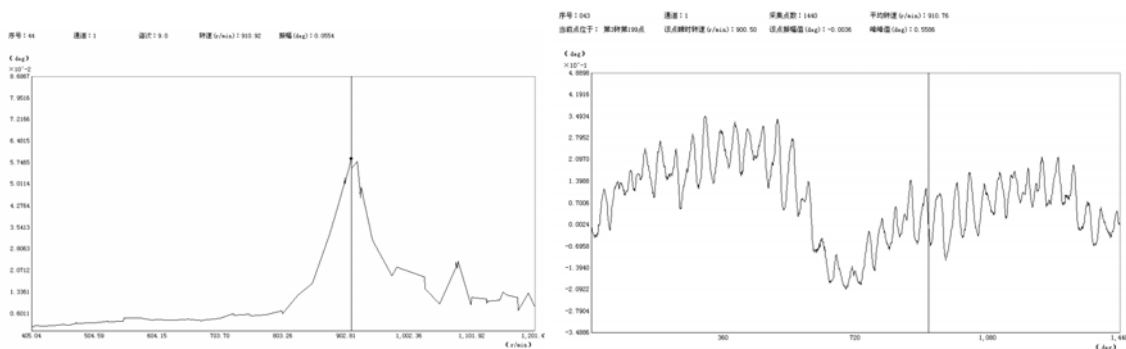


图 5.1-3 9 次频谱及原始波形

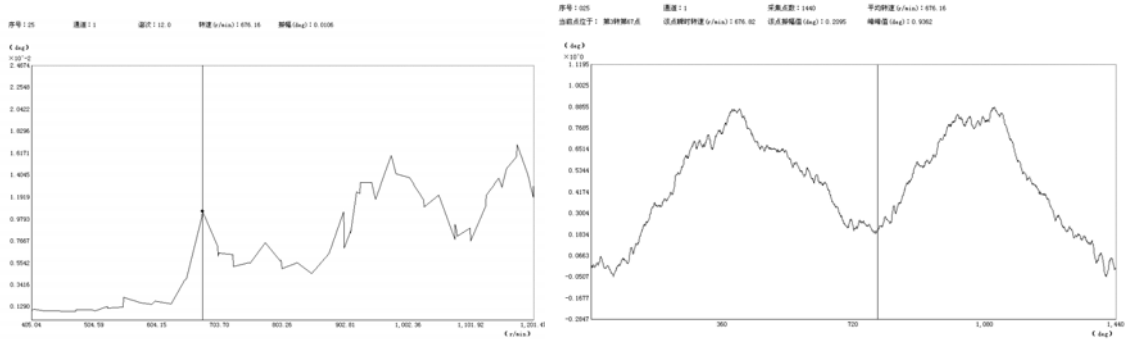


图 5.1-4 12 次频谱及原始波形

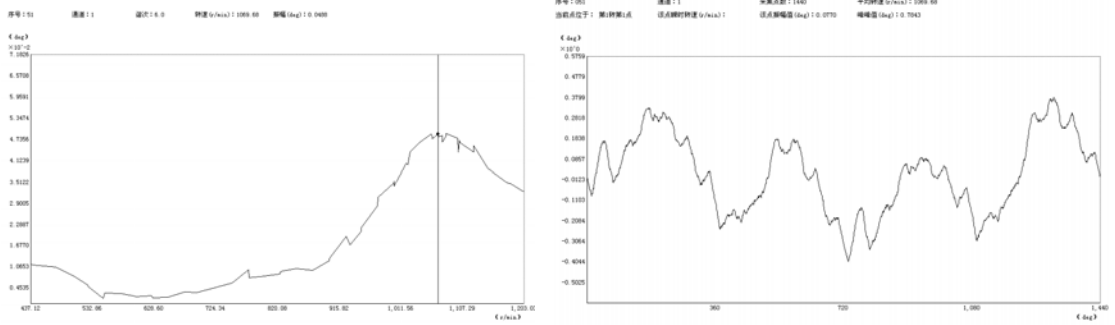


图 5.2-1 6 次频谱及原始波形

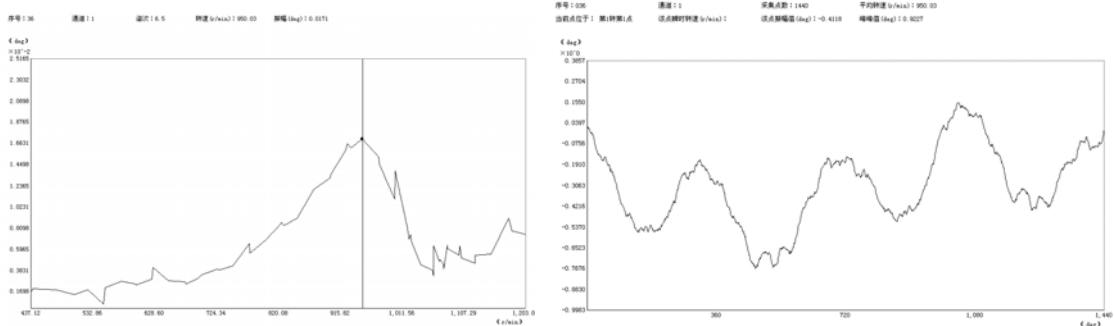


图 5.2-2 6.5 次频谱及原始波形

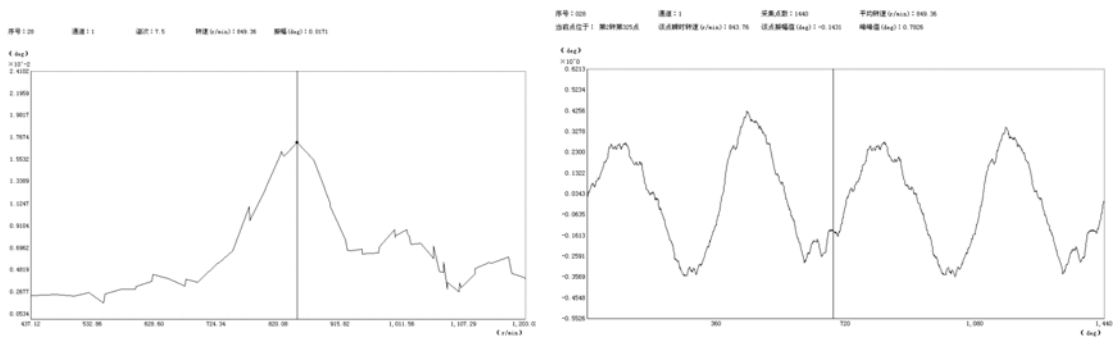


图 5.2-3 7.5 次频谱及原始波形

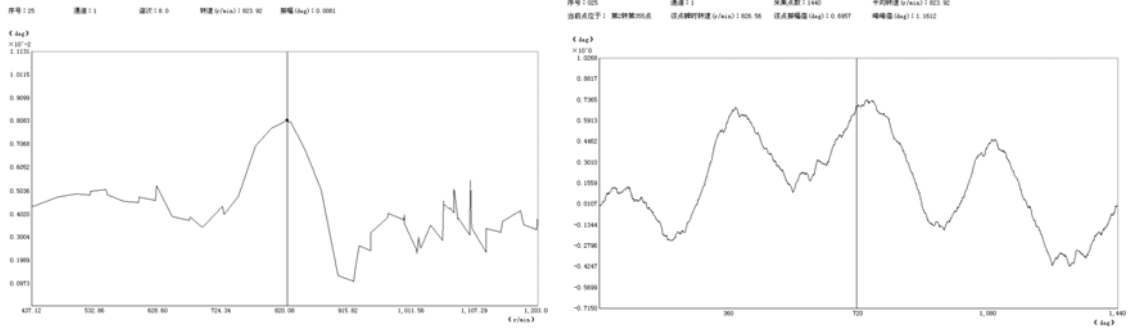


图 5.2-4 8 次频谱及原始波形

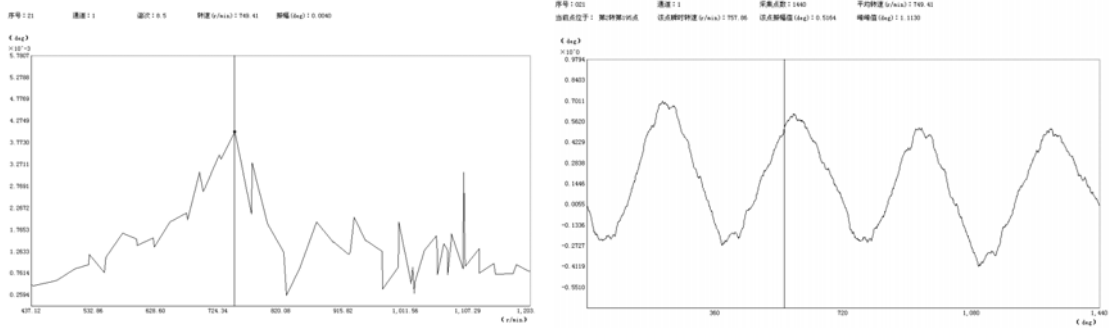


图 5.2-5 8.5 次频谱及原始波形

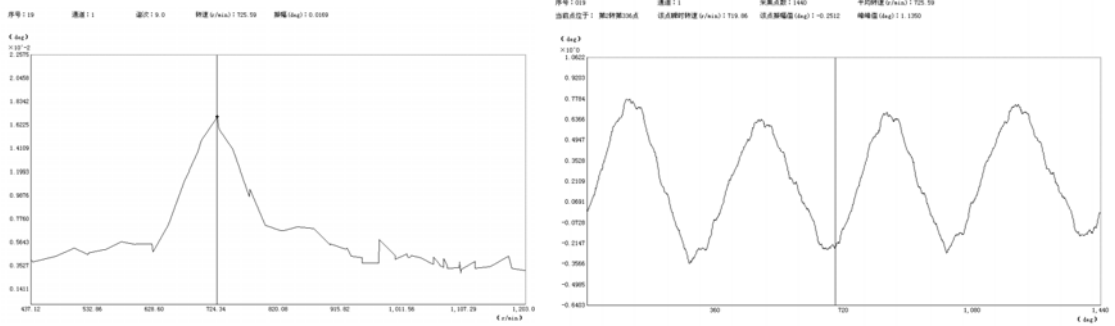


图 5.2-6 9 次频谱及原始波形

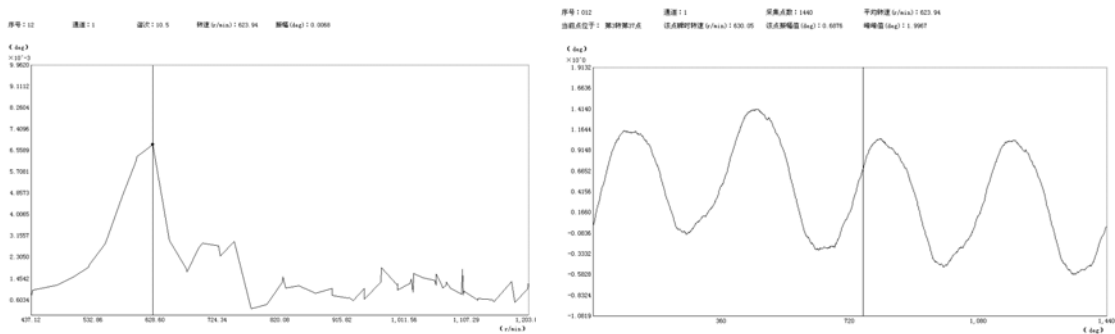


图 5.2-7 10.5 次频谱及原始波形

6. 硅油减振器扭振参数（本指南 6.3.6②）:

6.1 单机扭振参数的核定

6.1.1 单机的当量系统图、扭振参数和固有频率计算分别见图 6.1.1、表 6.1.1-1 和表 6.1.1-2。

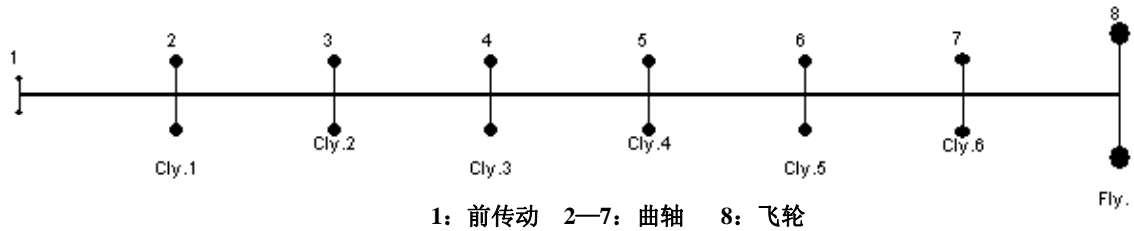


图 6.1.1 当量系统图

表 6.1.1-1 单机扭振参数

质量号	惯量 I (kg.m ²)	柔度 E (E-10 rad/N.m)	外径 D (mm)	内径 d (mm)	速比
1	0.3105	1041.7752	133.0	0.0	1.0
2	0.6992	1199.76	133.0	0.0	1.0
3	0.6992	1199.76	133.0	0.0	1.0
4	0.6992	1199.76	133.0	0.0	1.0
5	0.6992	1199.76	133.0	0.0	1.0
6	0.6992	1199.76	133.0	0.0	1.0
7	0.7411	1211.0936	133.0	0.0	1.0
8	11.8521				1.0

表 6.1.1-2 自由振动计算
单结固有频率 $F=8514.1$ 1/min

质量号	惯量 (kg.m ²)	柔度 (rad/N.m)	相对振幅	扭矩 (k.N.m)	速比
1	3.1050 E-01	1.042 E-07	1.000 E+00	2.468 E+02	1.0
2	6.9920 E-01	1.200 E-07	9.743 E-01	7.884 E+02	1.0
3	6.9920 E-01	1.200 E-07	8.797 E-01	1.277 E+03	1.0
4	6.9920 E-01	1.200 E-07	7.265 E-01	1.681 E+03	1.0
5	6.9920 E-01	1.200 E-07	5.248 E-01	1.973 E+03	1.0
6	6.9920 E-01	1.200 E-07	2.881 E-01	2.133 E+03	1.0
7	7.4110 E-01	1.211 E-07	3.218 E-02	2.152 E+03	1.0
8	1.1852 E+01		-2.284 E-01		1.0

6.1.2 实测与计算频率误差:

由图 4.1-2、图 4.1-3 和图 4.1-4 得知实测固有频率为:

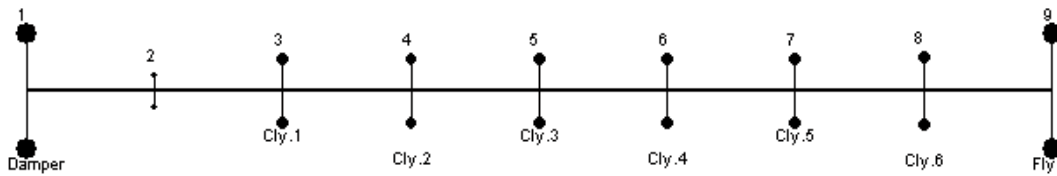
$$N^1 = \frac{7.5 \times 1079.3 + 9 \times 910.8 + 12 \times 676.2}{3} = 8131.5 \quad 1/\text{min}$$

实测与计算频率的相对误差为:

$$\delta = \frac{8514.1 - 8131.5}{8131.5} \times 100\% = 4.7\%$$

6.2 硅油减振器扭振参数的换算

6.2.1 单机+硅油减振器的当量系统图、扭振参数和固有频率计算分别见图 6.2.1、表 6.2.1-1 和表 6.2.1-2。



1: 减振器 2: 前传动 2—7: 曲轴 8: 飞轮

图 6.2.1 当量系统图

表 6.2.1-1 单机+减振器扭振参数

质量号	惯量 I (kg.m ²)	柔度 E (E-10 rad/N.m)	外径 D (mm)	内径 d (mm)	速比
1	1.295	1041.6667	142.0	0.0	1.0
2	0.3105	1041.7752	133.0	0.0	1.0
3	0.6992	1199.76	133.0	0.0	1.0
4	0.6992	1199.76	133.0	0.0	1.0
5	0.6992	1199.76	133.0	0.0	1.0
6	0.6992	1199.76	133.0	0.0	1.0
7	0.6992	1199.76	133.0	0.0	1.0
8	0.7411	1211.0936	133.0	0.0	1.0
9	11.8521				1.0

表 6.2.1-2 自由振动计算
单结固有频率 F=6906.1 1/min

质量号	惯量 (kg·m ²)	柔度 (rad/N·m)	相对振幅	扭矩 (k·N·m)	速比
1	1.2950 E+00	1.042 E-07	1.000 E+00	6.771 E+02	1.0
2	3.1050 E-01	1.042 E-07	9.295 E-01	8.280 E+02	1.0
3	6.9920 E-01	1.200 E-07	8.432 E-01	1.136 E+03	1.0
4	6.9920 E-01	1.200 E-07	7.069 E-01	1.395 E+03	1.0
5	6.9920 E-01	1.200 E-07	5.395 E-01	1.592 E+03	1.0
6	6.9920 E-01	1.200 E-07	3.485 E-01	1.719 E+03	1.0
7	6.9920 E-01	1.200 E-07	1.423 E-01	1.771 E+03	1.0
8	7.4110 E-01	1.211 E-07	-7.027 E-02	1.744 E+03	1.0
9	1.1852 E+01		-2.815 E-01		1.0

6.2.2 实测与计算频率的相对误差:

由图 4.1-1~4.1-7 得知实测固有频率为:

$$N^I = \frac{6 \times 1070.2 + 6.5 \times 950.3 + 7.5 \times 849.4 + 8 \times 823.9 + 8.5 \times 749.4 + 9 \times 725.6 + 10.5 \times 623.9}{7} = 6425.6 \quad 1/\text{min}$$

实测与计算频率的相对误差为:

$$\delta = \frac{6905.1 - 6425.6}{6425.6} \times 100\% = 7.4\%$$

6.2.3 硅油减振器当量转动惯量的换算:

由表 6.2.1-1 可知, 在最佳阻尼设计时, 硅油减振器当量转动惯量为:

$$I_d' = \frac{1.03}{2} + 0.78 = 1.295 \quad \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

将硅油减振器当量转动惯量修正为 1.5 kg·m² 时, 固有频率计算见表 6.2.3。

表 6.2.3 硅油减振器修正后的自由振动计算
单结固有频率 F=6719.1 1/min

质量号	惯量 (kg·m ²)	柔度 (rad/N·m)	相对振幅	扭矩 (k·N·m)	速比
1	1.5000 E+00	1.042 E-07	1.000 E+00	7.426 E+02	1.0
2	3.1050 E-01	1.042 E-07	9.226 E-01	8.845 E+02	1.0
3	6.9920 E-01	1.200 E-07	8.305 E-01	1.172 E+03	1.0
4	6.9920 E-01	1.200 E-07	6.899 E-01	1.411 E+03	1.0
5	6.9920 E-01	1.200 E-07	5.206 E-01	1.591 E+03	1.0
6	6.9920 E-01	1.200 E-07	3.298 E-01	1.705 E+03	1.0
7	6.9920 E-01	1.200 E-07	1.252 E-01	1.748 E+03	1.0
8	7.4110 E-01	1.211 E-07	-8.459 E-02	1.717 E+03	1.0
9	1.1852 E+01		-2.926 E-01		1.0

实测与计算频率的相对误差为：

$$\delta = \frac{6719.1 - 6425.6}{6425.6} \times 100\% = 4.5\%$$

6.2.4 硅油减振器阻尼系数的换算。

调整不同的阻尼系数对主谐波 6 次进行分析解法计算，使计算测点处的振幅与实测值基本一致，见表 6.2.4。

表 6.2.4

谐次	临界转速 (r/min)	实测 振幅 (°)	计算振幅(°)			
			最佳阻尼	50 N·m·S/rad	100 N·m·S/rad	150 N·m·S/rad
6	1070	0.0488	0.0219	0.041	0.0383	0.0364

6.2.5 结论。

该机型所配置的硅油减振器在扭振计算时应选取如下的扭振参数：

减振器当量转动惯量 I_x : 1.5 kg·m²

阻尼系数 C_d : 50 N·m·s/rad